第 38 卷第 8 期 生 态 学 报 Vol.38,No.8
2018 年 4 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Apr.,2018

DOI: 10.5846/stxb201705020796
魏伟,石培基,魏晓旭,周俊菊,颉斌斌.中国陆地经济与生态环境协调发展的空间演变.生态学报,2018,38(8):2636-2648.
Wei W,Shi P J,Wei X X,Zhou J J,Xie B B.Evaluation of the coordinated development of economy and eco-environmental systems and spatial evolution in China.Acta Ecologica Sinica,2018,38(8):2636-2648.

中国陆地经济与生态环境协调发展的空间演变

魏 伟[1],石培基[1,*],魏晓旭[1],周俊菊[1],颉斌斌[2]
1 西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070
2 兰州城市学院城市经济与旅游文化学院,兰州 730070

摘要:以中国 2853 个县(区)的 GDP 数据和全国 1km 格网土地利用数据为基础,通过构建 ESV、YEEH 和 EEHC 模型,依据 ESV 和 GDP 单位面积变化计算中国陆地经济与生态环境协调度,并借助 ArcGIS 10.1 平台对 YEEH 和 EEHC 栅格数据进行空间分析,以此揭示中国陆地经济发展与生态环境系统的相关关系和演变特征。研究表明:(1)中国陆地经济与生态环境协调发展度逐渐好转,呈现出东北地区好于西部地区,西部地区好于中、东部地区的空间格局,反映出当面社会经济活动与自然生态环境关系之间总体上向着可持续的方向发展;(2)中国陆地经济与生态环境协调发展的空间分布状态从 1980 年的低于均值聚集模式发展变化到 2010 年的高—低两种聚集模式共同分布;(3)中国陆地经济社会与生态环境发展协调度当前整体上趋于好转,但在区域分布上空间差异较为明显,西部地区在保护生态环境的同时需大力发展经济,而东中部地区则需在发展经济的同时注重生态保持与修复,中国的经济发展与生态环境建设工作依然任重而道远。
关键词:经济与生态环境协调度;空间演变模式;中国陆地

Evaluation of the coordinated development of economy and eco-environmental systems and spatial evolution in China

WEI Wei[1],SHI Peiji[1,*],WEI Xiaoxu[1],ZHOU Junju[1],XIE Binbin[2]
1 *College of Geographical and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *China*
2 *School of Urban Economics and Tourism Culture, Lanzhou City University, Lanzhou* 730070, *China*

Abstract: Based on Gross Domestic Product (GDP) and 1km×1km land use data for 1980, 1990, 2000, and 2010, and using 2853 counties or districts as basic units, this study used models such as Ecosystem Service Value (ESV), Year of Economy-Environmental Harmonize (YEEH), and Economy-Environmental Harmonize Change(EEHC) and calculated the relationship between the economy and eco-environment according to the per unit area change of ESV and GDP. YEEH and EEHC indices were used to reflect the relationship between economic development and eco-environment systems of China and its evolution. The results showed that the coordination between economy and eco-environment continuously improved from 1980 to 2010. The EEHC in northern China was better than that in the western region, and the EEHC in western China was better than that in the central and eastern regions, reflecting the sustainable development of relationships between socio-economic activities and natural ecological environments. The spatial distribution of coordination between economy and eco-environment in China appeared aggregated model and its value was lower than the average in 1980. However, it developed to both high and low aggregation patterns in 2010. Furthermore, the degree of coordination between economic society and ecological environment changed for the better, but the distribution in different regions was very different and apparent. The

基金项目:国家自然科学基金项目(41661084);甘肃省自然科学基金项目(1506RJZA129);西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(SKQNYB14032)
收稿日期:2017-05-02; **网络出版日期**:2018-01-08
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shipj@nwnu.edu.cn

results also showed that the economy should be developed when the ecological environment in the western region is protected, whereas ecological maintenance and restoration need to be considered when developing the economy in the central and eastern regions. There is still a long way to go for China′s economic development and ecological environmental construction.

Key Words: economic and ecological coordination; special evolution pattern; China

可持续发展已经成为中国当今社会的共识,而可持续发展的基本内涵就是社会经济与生态环境协调发展,经济与生态环境协调发展已被公认为处理经济增长与环境保护间关系的最佳选择,也是保证实现人类社会可持续发展战略目标的必由之路[1]。而对经济协调发展的定量评价,可为这一目标的实现提供相关的理论依据,这有利于根据协调度的变化及时采取措施进行调控,为社会经济系统与自然生态系统协调稳定发展提供保障。

近年来生态环境与经济协调发展已经成为可持续发展研究的热点领域之一。国外学者主要将土地利用变化引入经济发展与生态环境协调度研究中,研究方法主要有不同尺度评价模型法[2],时空变化规律法[3],市场价值法[4]、土地功能与经济发展统一性[5]和可持续性评估法[6-7]等。从协调发展实践来看,国外对生态经济的协调发展的实践主要以探讨生态工业园区的建立,对各生态工业园区的相关政策或内部经济循环的可持续发展措施做出总结,以及具有特色的生态村和生态城市的生态经济进行相关研究。在国内,学者针对定量评价的理论与模型开展了大量研究,如综合指标评价法[8],生态足迹法[9],能值分析法[10],物质流分析法[11]和系统动力学模型法[12]等。国内学者关注理论、方法和评价模型的较多,而在应用和实践方面,由于生态环境与经济协调发展问题的综合性与复杂性,需综合地理学、生态学和经济学等众多学科。因此其定量评价研究仍然有待于寻求新的途径来深化研究[13]。从上述来看,学者对经济与生态环境协调度的研究主要集中于区域经济协调发展理论、生态经济协调发展评价和生态与经济协调发展应用实践三个方面,其中在理论方面学者们强调经济发展与自然生态相适应、相促进,与自然生态之间是种可持续的良性循环。生态经济的协调性,从经济学上来说,是比以往获得更多的利益,从生态上来说,是较以往的发展能使生态环境得到更进一步改善。在生态经济协调发展评价方面的研究主要集中在变异系数协调度[14]、序参量功效函数协调度[15]、模糊隶属函数协调度[16]的研究上,目前在评价方法上偏向于多种方法的集成使用,而在协调发展应用实践方面,国内关于生态经济协调发展的实践主要以探讨以发展生态农业、生态工业和生态旅游业为主导来发展生态经济。本研究在尺度上,以县域单元为主探究全国经济发展与生态环境变化;在研究方法上,引入空间统计中的 Getis-Ord G_i^* 指数研究生态与经济空间关联和空间模式。

1　数据及研究方法

1.1　研究区域与数据源

本文以县级单元作为研究全国区域经济与生态环境差异及其空间格局的基本单元,行政区划按 2008 年进行归并统一,将其转化为矢量行政边界,基本单元包括县、自治县、县级市和市辖区。此外,由于全国 4 个地级市不设市辖区(甘肃省嘉峪关市、海南省三亚市、广东省中山市、广东省东莞市),便于分析和制图,将四个市纳入基本研究单元,这样研究区基本单元共为 2853 个,研究时段为 1980 年、1990 年、2000 年和 2010 共 4 个时段。

本研究数据为 2853 个基本单元 4 个时段的 GDP 和人均 GDP 数据。统计数据主要来源于《CNKI 中国经济与社会发展统计数据库》、《中国地区经济发展报告》、《中国区域经济统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、各省份统计年鉴、部分省份与地级市年鉴以及部分市、县、区的国民经济与社会发展统计公报。中国 4 个时段土地利用数据,主要来源于中科院资源环境数据库 1:10 万土地利用图,包括 1980、1995 和 2000 年的全国 1km 格网数据库,每个格网带有耕地、林地、园地、草地、城镇居民点用地、工矿用地、交通用地、未利用地等的土地

类型代码和面积比例。2010 年土地利用数据来源于欧空局全球陆地覆盖数据(ESA GlobCover),分辨率为 300m,数据格式为 TIF。GlobCover 全球陆地覆盖数据的原始数据来自 Envisat 卫星,由 MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer)传感器拍摄完成。数据生成过程中,主要选取了 MERIS 传感器在 2009 年 1 月 1 日至 12 月 31 日期间所接收的较高质量的影像数据,来进行图像合成。

1.2 数据处理

1.2.1 生态环境数据处理

本研究利用中国陆地不同时段的土地利用数据进行生态系统服务价值(ESV)测算,计算时将四期数据均重采样为 1km×1km 栅格数据,其中在 1980、1995 和 2000 年数据中将 25 种类型统一归并为一级类。将 2010 年数据中 23 类土地类型根据《中国土地资源分类系统》归并为一级类。上述四期土地利用类型均合并为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大类,用于计算中国陆地生态系统服务价值。数据投影统一为 Krasovsky1940_Lambert Conformal Conic。

1.2.2 经济数据处理

在收集 GDP 数据时,2000 年和 2010 年数据均由数据库和年鉴直接查询获得。1980 年 GDP 数据中有 984 个县区由于缺乏统计,采用两种方法推算求得:①对于有人均 GDP 的县区,采用人口数据和人均 GDP 相乘得到结果;②对于有经济增长率数据的县区,采用增长率进行推算。以上推算数据经过验证,精度满足本次研究的需要,限于篇幅,不在赘述,请参考相关文献[17]。为便于和生态系统服务价值栅格数据相匹配进行协调度空间格局变化研究,将四期县级单元 GDP 数据进行栅格化处理:在 ArcGIS 10.1 中利用表面建模工具(Spling)进行栅格化;再对栅格化后的数据利用自然分类法(Natural Breaks (Jenks))进行分类制图。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值计算方法

目前国内外生态系统服务物质量和价值量的评估方法很多,但都难以得出让公众和学术界普遍接受的结果,相比之下 Costanza 等[18]确定的生态系统功能基准单价和谢高地等[19]确定的生态系统功能基准单价在当前国内生态系统服务价值评估中运用最为广泛。本研究借鉴 Costanza 和谢高地等提供的生态系统服务价值的计算模式,公式为:

$$\mathrm{ESV} = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} A_j E_{ij} \quad (i=1,2,\cdots m; j=1,2,\cdots n) \tag{1}$$

式中:ESV 为区域生态系统服务价值;A_j 为 j 类生态系统面积;E_{ij} 为 j 类生态系统的 i 类生态系统功能基准单价。谢高地等人[19]在 Costanza 等提出的评价模型的基础上,对国内 500 位生态学者进行问卷调查,制定了“中国陆地生态系统单位面积服务价值当量因子表”。该方法是针对全国平均状况,能够从宏观尺度上表征中国陆地生态系统价值情况,因此适合全国尺度的生态系统服务研究。本研究结合气体调节、气候调节等功能,在参考中国陆地生态系统单位面积服务价值当量因子表的基础上结合研究实际[19],对部分当量做了适当调整,得到陆地生态系统服务当量(表 1)。

1.3.2 经济生态协调发展评价方法

目前,经济与环境的协调发展没有统一的标准,二者系统间的协调度是一个相对指标。我国学者王振波[9]、苏飞[20]和乔标等人[21]在构建环境与经济协调度时利用了生态系统服务价值与 GDP 比值。本研究在分析生态环境与经济协调发展及其内涵的基础上,构建了年度经济环境协调度指数(YEEH)和经济环境协调度变化指数(EEHC)。YEEH 是指研究时段节点上单位面积生态系统服务价值(ESVea)与单位面 GDP(GDPea)之比。这种比值是一个参考值,用以表征当年经济发展与固有环境之间的协调关系[22]。EEHC 定义为究期内单位面积生态系统服务价值的变化率(ESVpr)与单位面积 GDP(GDPpr)变化率之比。这种比值关系能更好地反映环境变化与经济发展过程中二者相互影响、相互制约或推动的程度。YEEH 和 EEHC 相关公式如下:

表 1　中国陆地不同生态系统单位面积生态服务价值表/(元 hm^2 a^{-1})

Table 1　The different terrestrial ecosystems and corresponding ecological service value in China

生态系统功能 The ecosystem functions	耕地 Cropland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waterbody	未利用地 Unused land
气体调节 Gas regulation	442.4	3097.0	707.9	0	0
气候调节 Climate regulation	787.5	2389.1	796.4	407.0	0
水源涵养 Water conservation	530.9	2831.5	707.9	18033.2	26.5
土壤形成与保护 Soil formation and conservation	1291.9	3450.9	1725.5	8.8	17.7
废物处理 Waste treatment	1451.2	1159.2	1159.2	16086.6	8.8
生物多样性保护 Biodiversity conservation	628.2	2884.6	964.5	2203.3	30.8
食物生产 Food production	884.9	88.5	265.5	88.5	8.8
原材料 Raw materials	88.5	2300.6	44.2	8.8	0
娱乐文化 Recreation	8.8	1132.6	35.4	3840.2	8.8
总计 Total	6114.3	19334	6406.5	40676.4	371.4

$$\mathrm{YEEH}=\frac{\mathrm{ESVea}}{\mathrm{GDPea}} \tag{2}$$

$$\mathrm{EEHC}=\frac{\mathrm{ESVpr}}{\mathrm{GDPpr}} \tag{3}$$

$$\mathrm{ESVpr}=\frac{\mathrm{ESVp}_j-\mathrm{ESVp}_i}{\mathrm{ESVp}_i} \tag{4}$$

$$\mathrm{GDPpr}=\frac{\mathrm{GDPp}_j-\mathrm{GDPp}_i}{\mathrm{GDPp}_i} \tag{5}$$

式中，ESVea 和 GDPea 分别指研究时间点上单位面积上生态系统服务价值（万元/hm^2）和单位面积 GDP（万元/hm^2）；$ESVp_i$、$ESVp_j$ 分别为不同时段始、末年份生态系统服务价值（万元/hm^2）；$GDPp_i$、$GDPp_j$ 分别为不同时段始、末年份的单位面积 GDP（万元/hm^2）。

公式（2）中，根据二者比值大小按照经济与生态环境系统协调划分标准进行分级制图；在（3）存在 4 种可能情况：（1）如果 4）>0 且（5）>0，则（2）>0，经济-生态环境系统处于协调状态，这说明环境与经济达到了可持续发展，并朝良性方向发展。（2）如果（4）>0 且（5）<0，则（3）<0，生态经济系统处于非协调状态，某些区域由于自然植被长势良好或人为干预使得生态环境不断好转，但这些区域经济发展缓慢，制约了生态环境自我修复，自我改善能力。（3）如果（4）<0 且（5）>0，则（3）<0，生态经济系统处于非协调状态，某些区域由于一味追求 GDP 增长，进而忽视生态环境保护和建设，导致经济发展快速，而生态环境严重恶化；（4）如果（4）<0 且（5）<0，则（3）>0，这说明区域在研究期的初始阶段在发展经济时已经严重破坏了生态，区域为提高整个环境对社会经济的支撑能力，不得不进行生态保育，提高生态系统的服务功能，经济发展明显地受到生态环境的制约。由于中国经济 1980 年以来处于快速增长状态，且在四个时段 GDP 统计值均为增长，故在公式（5）<0 的情况不予考虑。

1.3.3　经济-生态环境系统协调度的划分

在研究过程中，根据 YEEH 比值不同，按照如下标准进行分类：0<YEEH≤0.3（高度恶化区）；0.3<YEEH≤0.6（恶化区）；0.6<YEEH≤0.9（恶化协调过渡区）；0.9<YEEH≤1.2（协调区）；1.2<YEEH≤1.5（恶化协调过渡区）；1.5<YEEH≤1.8（恶化区）；YEEH>1.8（高度恶化区）。根据计算结果，将中国陆地 YEEH 栅格结果划分为五大类，分别分析各类分区时空分布格局和变化规律。

根据 EEHC 计算结果和演变特征，对 EEHC 进行以下判断和划分：①EEHC≥1 表示该时段 ESV 的增长速度不低于 GDP 增长速度，经济-生态环境系统处于协调状态。此状态表示研究区生态与经济之间是一种和

谐、相互促进的自然状态,或者是自然生态环境恶劣,经济发展落后,但经过自然或人为修复,达到了二者协调的状态;②0≤EEHC<1 表示研究区 GDP 的增长速度稍高于 ESV 增长,经济与生态环境仍处于协调状态,但经济增长可能正在承受越来越大的生态环境压力;EEHC 值越小表示环境经济协调水平越低;③-1≤EEHC<0 表示中国陆地 ESV 负增长,经济发展已经对生态环境产生负面影响,生态经济关系进入不协调状态,经济发展与生态环境保护产生冲突;④EEHC<-1 表示陆地生态系统服务价值降低明显,生态环境发生恶化,经济发展与生态保护和恢复产生冲突,经济与生态环境发展严重不协调。由于 EEHC 表现为研究时段内经济发展与生态环境演变态势,因此根据 EEHC1980—1990、EEHC1990—2000、EEHC2010—2000 和 EEHC2010—1980 的 4 个时段的计算结果,根据上述判断结果将其划分为:持续恶化区(EEHC<-1)、初始恶化区(-1≤EEHC<0)、协调稳定区(0≤EEHC<0.6 或 EEHC≥1.2)、初始协调区(0.6≤EEHC< 1)和持续协调区(1≤EEHC<1.2)5 个分区,以上 YEEH 和 EEHC 均在 GIS 中聚类和制图。

1.3.4 空间统计方法

EEHC 作为不同的区域化变量,它们在不同时段内空间上的演变规律,可采用空间统计学方法来分析,其中空间自相关的局部指标用来计算每一个空间单元与邻近单元在某一属性上的相关程度[23]。在生态风险研究中,空间格局分析方法可以用于检验空间变量的取值是否与相邻空间上该变量取值大小有关。如果空间变量在某一点上的取值与相邻点的取值变化趋势相同,称为空间正相关,相反则称为空间负相关[24]。空间格局分析的局部指标包括局部 Morans 指数(Local Morans I)和局部 Geary 指数(Local Getis-Ord G_i^*)两个方面,本研究采用 Getis-Ord G_i^* 指数来确定相似或不相似的空间模式,它可以用来测定中国陆地经济发展与生态环境协调度的热点和冷点地区,从而发现经济与生态环境协调度之间可能存在的空间分布关系。计算公式为:

$$G_i^*(d) = \sum_1^n W_{ij}(d) X_i / \sum_1^n X_i \tag{6}$$

式中,X_i为地区单元 i 的观测值;W_{ij}为空间权重矩阵,空间相邻为 1,不相邻为 0。若 G_i^* 值显著为正,表明 i 地区周围的值相对较高,属于热点地区;反之则为冷点地区。

2 结果与分析

2.1 中国陆地各研究时段经济与生态环境协调发展的县(区)域单元变化

经统计发现(表 2),1980 年时段共有 935 个县(区)处于恶化区内,其中有 352 个处于高度恶化区,占全国总县(区)数的 12.33%,有 1020 个县(区)处于协调区内,但处于高度协调区的只有 259 个,仅占全国总县(区)数的 9.07%;到 1990 年处于恶化区和协调区的县(区)个数差距不大,其中处于高度恶化区内的个数占全国县(区)数的 12.05%,处于高度协调区内的个数占全国县(区)数的 9.81%;从 2000 年开始,这一情况开始有所变化,其中处于恶化区的总县(区)数为 852 个,比 1980 年和 1990 年分别减少 83 个和 59 个,其中处于高度协调区内的个数占全国县(区)数的 10.44%,处于高度协调区内的个数占全国县(区)数的 10.23%;到 2010 年,高度协调区内的县(区)数进一步增加,而处于恶化区的县(区)数减少明显,其中处于高度恶化区和恶化

表 2 中国陆地不同研究时段 YEEH 类别及县(区)数目统计

Table 2 YEEH classification and quantity statistic in China from1980 to 2010

研究时段 Research period	高度恶化区 High deteriorative area	恶化区 Deteriorative area	恶化协调过渡区 Deterioration-Coordination transition area	协调区 Coordinated area	高度协调区 High coordinated area	合计 Total
1980	352	583	898	761	259	2853
1990	344	567	879	783	280	2853
2000	298	554	904	805	292	2853
2010	239	476	824	967	347	2853

区的县(区)数分别为 239 和 476,远低于 1980 年的 352 个、583 个和 1990 年的 344 个、567 个,处于协调区内的县(区)数也达到了 1314 个,占全国总县(区)数的 46.05%,这种情况说明中国陆地经济-生态环境协调度在整体趋势上有所好转,并且在 2000 年以后协调发展程度明显提高。

2.2　研究时段年度经济与生态环境协调度变化特征

根据公式(2)计算出研究年度经济发展与生态环境协调度,它能体现单位面积上 ESV 和 GDP 的协调情况,如果该年度 ESV 值较大,GDP 值亦较大,则表明该地区在发展经济的同时其生态系统价值量也较好。通过比较结果发现,从 1980 年到 2000 年(图 1),除黑龙江和内蒙古东北部处于协调区和高度协调区外,中国陆地中北部广大地域 YEEH 主要处于高度恶化和恶化区,1980 年到 1990 年北方地区保持这种趋势不变,到 2000 年高度恶化区和恶化区区域有所减少,其中内蒙古中部、陕西北部和山西中部区域由高度恶化区转为恶化区域,黑龙江东部和吉林由恶化区转为恶化协调过渡区(图 1),表明 1980 年至 2000 年这些地区 GDP 与 ESV 在经济发展时,生态环境也有改善。2010 年与前 3 个时段相比,YEEH 空间分布集聚效应明显,主要表现

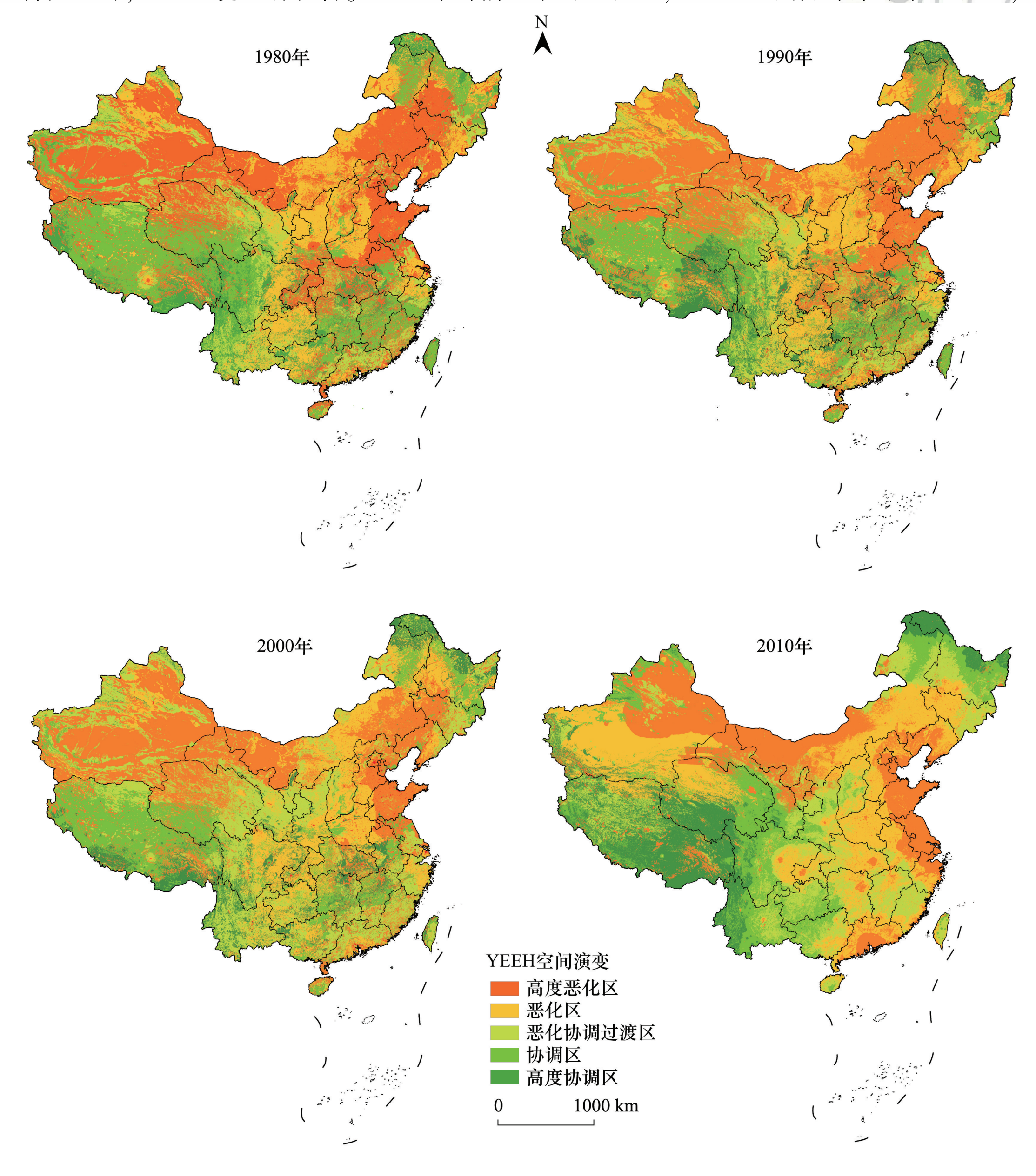


图 1　中国陆地年度经济环境协调度空间演变(1980—2010)

Fig.1　The spatial changes of YEEH in China from 1980 to 2010

在高度恶化区、恶化区和高度协调区在分布图上轮廓和层次较为分明(图 1)。具体来看,新疆北部、内蒙古西部和京津地区、山东、江苏等省处于高度恶化区内,面积占中国陆地总面积的 22.12%,新疆南部、青海西部、内蒙古东北部、河北南部、河南、湖北和安徽处于恶化区,面积越占中国陆地总面积的 27.98%,东北黑龙江和吉林东部、陕西和山西中西部以及江西等地主要分布于恶化协调过渡区,面积占中国陆地总面积的 19.24%;而协调区和高度协调区主要分布在西藏全境、青海西南部、四川东中部、云南和贵州及广西西部,这些地区面积共 $3.1\times10^6km^2$,占中国陆地总面积的 32.3%。通过 4 个不同时段的 YEEH 对比发现,中国陆地西南部和东北部处于协调区,而新疆、甘肃西部、内蒙古、山西、河北、山东和河南主要处于恶化区,由此可见,中国广大西部地区生态系统服务价值较高,随着经济的发展,尤其在 2000 年以后经济发展与生态环境协调度有提高的趋势,与此同时部分东中部省份在发力发展经济的同时,生态系统服务功能没有得到最大发挥,其协调度有所下降。

从 YEEH 各分区面积百分比分布来看(表 3),恶化区在 1980、1990、2000 和 2010 年分别占陆地总面积的 58.43%、56.31%、51.12%和 50.25%,恶化协调过渡区分别占陆地总面积百分比分别为 12%、12.04%、14.2%和 16.34%,而协调区则占总面积的百分比分比为 31%、32%、35%和 44%。恶化区面积减少协调区 $1.61\times10^6 km^2$,协调区面积增加 $1.36\times10^6km^2$。说明中国过去 30 多年间 YEEH 分布有较大变化,恶化区逐渐减少,而协调区有较大幅度的提升。

表 3 中国陆地 YEEH 分区统计情况

Table 3 YEEH classification statistic in China from 1980 to 2010

协调指数分区 YEEH classification	1980		1990		2000		2010	
	面积 Area/km^2	面积比 Area ratio	面积 Area/km^2	面积比 Area ratio	面积 Area/km^2	面积比 Area ratio	面积 Area/km^2	面积比 Area ratio
高度恶化区 High deteriorative area	3722321.10	0.39	3543940.78	0.37	3084772.14	0.32	2123690.32	0.22
恶化区 Deteriorative area	1776174.08	0.19	1827544.67	0.19	1860132.16	0.19	1727574.72	0.18
恶化协调过渡区 Deterioration-Coordination transition area	1186184.26	0.12	1159768.41	0.12	1353625.98	0.14	1558970.79	0.16
协调区 Coordinated area	1986369.49	0.21	2033384.65	0.21	1782047.00	0.19	1892132.80	0.20
高度协调区 High coordinated area	928951.29	0.10	1033344.59	0.11	1519422.94	0.16	2297631.59	0.24

2.3 中国陆地 EEHC 空间演变格局

为进一步研究中国陆地 GDP 和 ESV 同时发展变化的过程中其协调度的空间变化,根据划分标准将 EEHC 绘制成图,由图 2 可知,1980—1990 时段,中国陆地经济发展与生态环境协调度较低,新疆以西、西藏大部、四川中西部和浙江及江西部分地区处于持续恶化区,其中新疆、西藏和四川西部在此期间由于经济发展较慢,使得 EEHC 普遍较低,而浙江等东部部分区域由于过分注重经济发展,使经济发展速度超越生态系统服务价值演变速度,造成 EEHC 同样下降。新疆东部、甘肃西部、青海省和内蒙古西部处于初始协调区,初始恶化区和持续协调区分布较少,协调稳定区所占比例最大,主要分布在中东部地区;1990—2000 时段,持续恶化区域大幅减少,持续协调区开始增长,新疆东部、甘肃西部和内蒙古西部及青海中西部由 1980—1990 时段的初始协调区变为初始恶化区,四川和西藏大部由持续恶化区域变为初始恶化区和协调稳定区;与此相反,内蒙古东部、黑龙江西部和京津地区、山东、河南等地则由 1980—1990 时段的协调稳定区变为初始恶化区,表明这些地区经济与生态环境开始受到较大扰动,引起 GDP 和 ESV 二者变化率进一步拉大。2000—2010 时段,EEHC 由明显改善,恶化区和初始恶化区均有较大幅度减少,初始协调区和持续协调区开始增加。其中新疆西部、青海、西藏、四川、云南、贵州和东北黑龙江部分地区处于初始协调区和持续协调区,而新疆东中部、甘肃西部、内

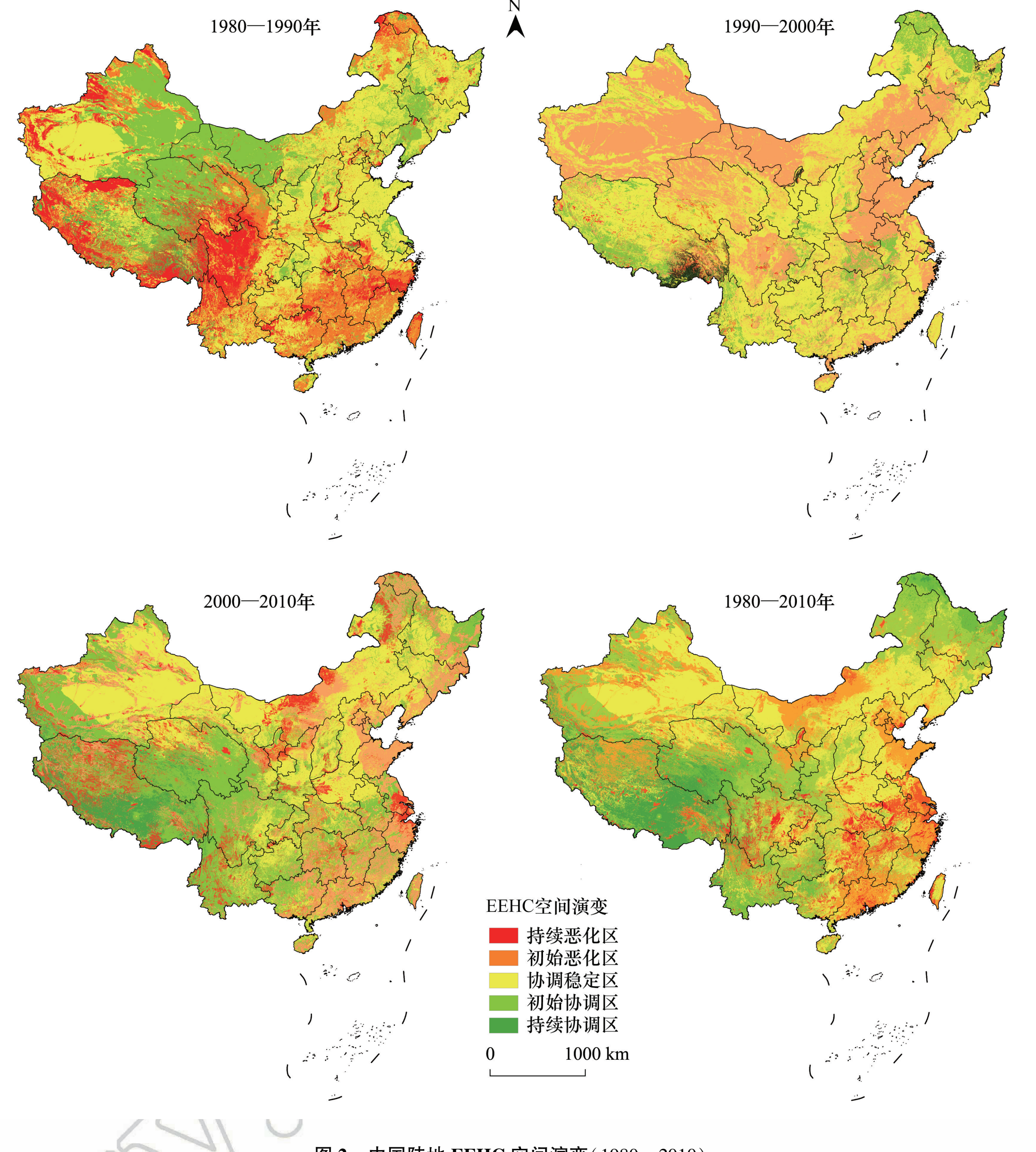


图 2　中国陆地 EEHC 空间演变(1980—2010)

Fig.2　The spatial changes of EEHC in China from 1980 to 2010

蒙古西部和东部、山西、陕西、河北、河南等地处于协调稳定区,只有内蒙古中部和江苏南部等小部分地区处于持续恶化区;由此可见,从 1980—1990、1990—2000 和 2000—2010 3 个时段中,EEHC 呈现整体转好,局部波动的现象,表明中国陆地在这此时段中出现了频繁经济和生态活动。纵观整个研究时段也发现,1980—2010 时段 EEHC 有较大改变,其中西藏、青海、内蒙古北部、云南、贵州和黑龙江部分地区处于持续协调区,面积约 $2.67\times10^6 km^2$,占中国陆地总面积的 27.8%,内蒙古东北部、黑龙江北部、甘肃和陕西南部、四川、贵州北部等地处于初始协调区,面积约 $0.39\times10^6 km^2$,占中国陆地总面积的4.1%,新疆东部、甘肃西部、青海西北部、内蒙古西部和东部、辽宁、河北、河南和山东西部处于协调稳定区,面积约 $1.75\times10^6 km^2$,占中国陆地总面积的 18.2%,内蒙古中部、山东东部、浙江大部、广东等区域处于初始恶化区,面积约 $3.09\times10^6 km^2$,占中国陆地总面积的 32.2%,而长三角大部分地区则处于持续恶化区,$1.71\times10^6 km^2$,占中国陆地总面积的 17.8%。研究表明,中国陆地经济发展与生态环境目前正在逐步走向好转,尚未出现大面积的协调度丧失情况,说明中国政府 2000 年开始的退耕还林还草工程和近年的生态建设工程建设的效益开始显现。但目前中国经济生态环境恶化区面

积远大于协调区，且在地域分布上并不均衡，部分区域出现了两极分化现象。

为更明显地表现中国区域经济发展与生态环境二者变化情况，在 ArcGIS10.1 中提取中国各省份的 EEHC 均值，并将相邻两个时段 EEHC 相减，比较各省不同时段 EEHC 增减变化情况（图 3），1980—1990 年间，中国西、中和东部地区均有增有减，其中西部地区减小最为明显，减小的省份有 4 个，减小值均超过 0.1，中部地区 EEHC 减小的由 2 个，值在 0.13 以下，东部地区 EEHC 减小的由 4 个；东北地区 EEHC 值具有增大，但增幅不大。1990—2000 年间，西部地区 EEHC 增减小的也是 4 个，但内蒙古由增大变为减小，且幅度最大，西藏则有减小变为增大；中部地区 EEHC 减小的也是 2 个，但河南由增大变为减小，幅度超多 1.5；江西由减小变为增大，增大幅度也最大（0.61—1.33），东部地区 EEHC 减小省份最多，达到了 6 个，分别为北京、天津、河北、山东、上海和浙江。东北地区 EEHC 增大，且增幅进一步扩大。2000—2010 年间，西部地区除新疆、宁夏和内蒙古由减小外，其余省份均增大，且减小幅度在降低，中度地区 EEHC 均减小，其中河南减小幅度最大，东部地区除港澳台外，区域省份也均减小，山东减小幅度最大，东北省份 EEHC 开始减小，吉林和辽宁减小幅度均在 0.6

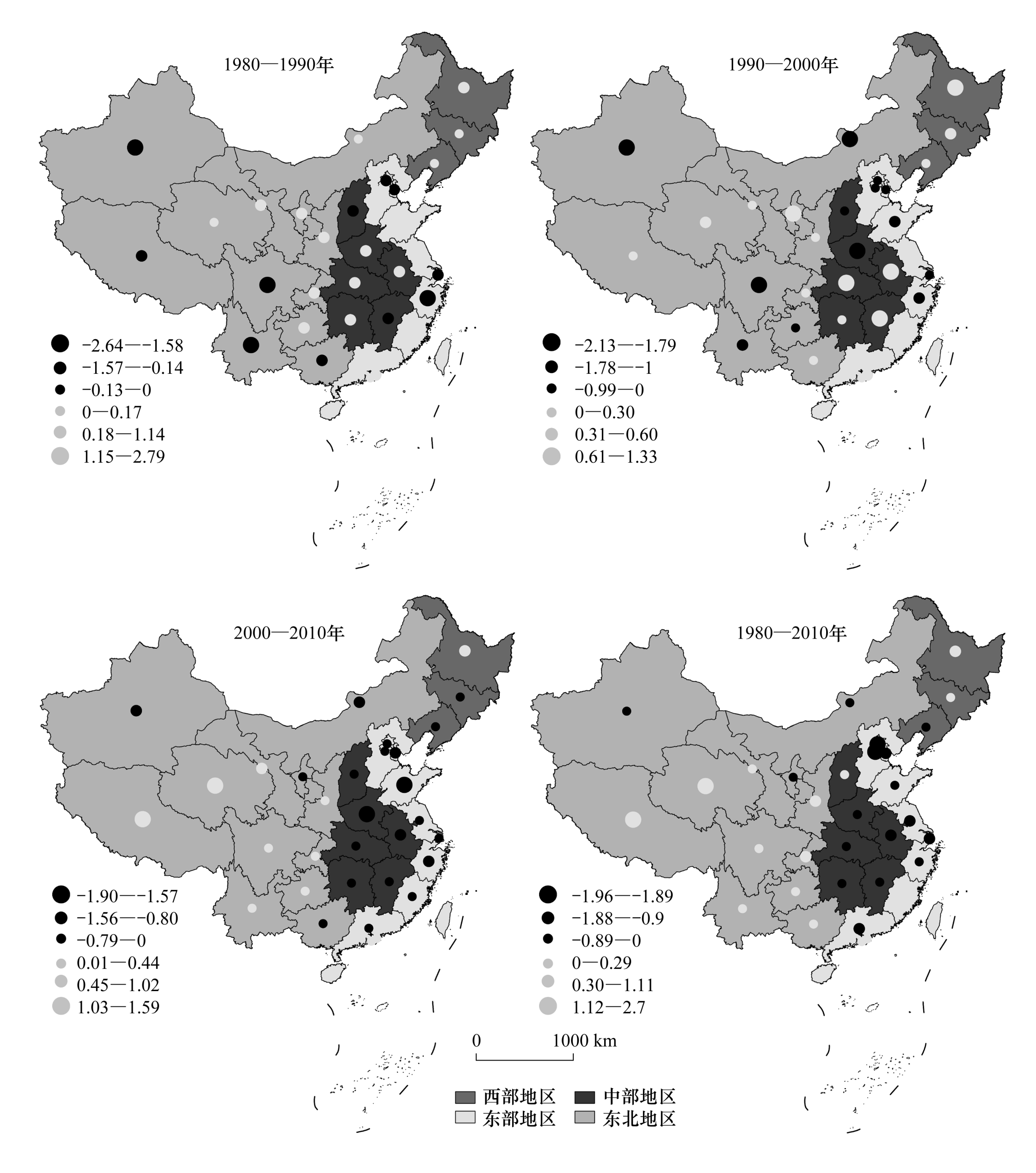


图 3　中国陆地 EEHC 省际变化特征（1980—2010）

Fig.3　EEHC changes of each province in China from 1980 to 2010

左右;从四个研究时段整体来看,西部地区大多省份 EEHC 均增大,且增大趋势明显,增大幅度也较大,而中部地区大多数省份由不同程度减小,减小幅度在 0—1.88 之间;东部省份 EEHC 减小数量最多(8 个),而且减小幅度也最大,尤以京津冀地区最为明显;东北地区 EEHC 有赠有减,但整体上变化不明显。从 EEHC 不同时间段的变化情况来看,中国陆地经济发展与生态环境协调度逐渐好转,呈现出东北好于西部,西部好于中、东部的空间格局,这也从另一方面验证了中国经济发展与生态环境协调度正在好转的趋势。

2.4　中国陆地经济与生态环境协调度空间演变模式

从空间统计分析图(图 4)中可以清晰地看到,中国陆地经济与生态环境协调发展空间统计值形成 7 类,并且在 GiZScore>2.58 时形成“热点”,在 GiZScore<-2.58 时形成“冷点”,总体呈现“热点”高度聚集分布模式,从 1980—1990 时段 GiZScore 空间分布图可以看出,1980 年中国陆地经济生态环境协调度空间分布态势整体较为均匀,虽有高值聚集区,但只有少数区域分布,且主要分布在青海西南部和西藏南部及东北部;而少

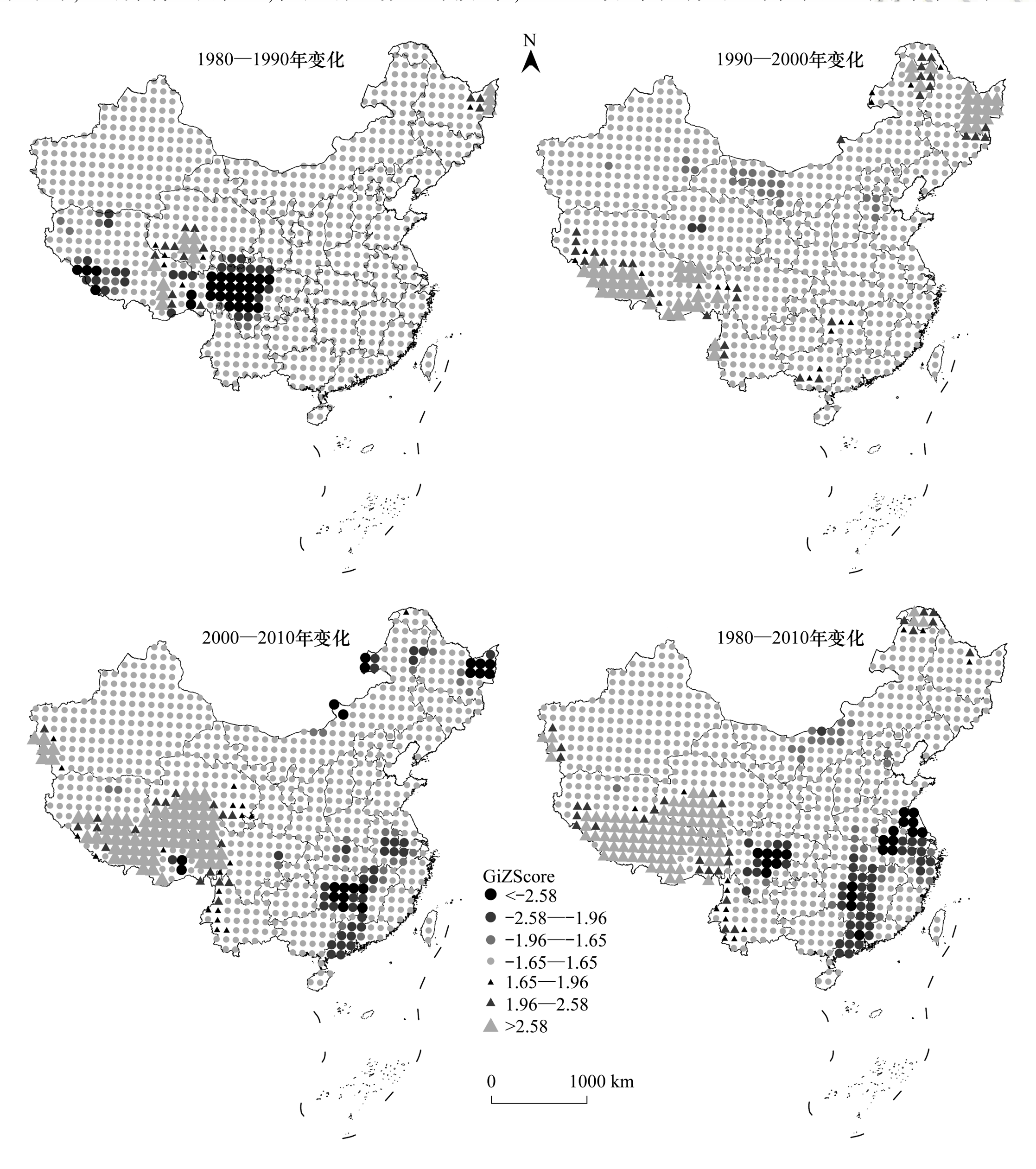


图 4　中国陆地 EEHC 研究单元热点、冷点地区分布(1980—2010)

Fig.4　Getis-Ord G_i^* values distribution of the EEHC in China from 1980 to 2010

量低于均值聚集区主要分布在西藏东部和四川西部,两部分冷点区域相连。1990—2000 时段内,未见低于均值聚集区,但高于均值聚集区较大面积出现,主要分布在西藏西南部和东部、内蒙古东北部、及云南西部,说明这些区域是 EEHC 波动变化的主要区域;2000—2010 时段内,低于均值区的冷点有广泛分布,中国东北部和南部地区有少量分布,而高于均值区的热点地区进一步聚集,开始聚集分布在西藏中东部、青海南部和新疆西部边境地区,而说明这些地区是 EEHC 波动起伏的主要地区。从 1980—2010 整个时段来看,热点区域主要分布在新疆西部、西藏中东部、青海南部和内蒙古东北部,且聚集效应明显,增加幅度也较大,而四川、湖南、广东、江苏、安徽和上海等地低于均值的冷点聚集特征也较为明显。以上现象说明中国陆地经济与生态环境协调发展的空间分布状态从 1980 年的低于均值聚集模式发展变化到 2010 年的高—低两种聚集模式共同分布,并且显示出热点高度聚集,而冷点低度聚集的特征,这进一步说明中国陆地经济与生态环境协调发展模式向高和低两个极端发展,并且在中国西南和东南两个区域同时波动变化。

3 讨论

3.1 中国陆地生态系统服务价值计算结果的准确性

由于目前国内关于经济与生态环境协调发展研究主要局限于一些特定区域或特定评价单元[25-26],而从全国尺度对其总的协调发展情况进行的评价缺少研究,因此,本文尚无法针对最终的经济与生态环境协调发展度结果进行比较,仅从影响结果的 GDP 和 ESV 这两个方面进行对比,而 GDP 主要通过中国官方发布的统计数据获得,其准确性被认为达到研究的要求。因此,本人主要对 ESV 结果进行了对比,在中国陆地生态系统服务价值方面,本研究得出中国陆地 1980 年、1990、2000 年和 2010 年总生态系统服务价值分别为 6.591 万亿元、6.575 万亿元、6.749 万亿元和 6.958 万亿元。这与石垚等人[27]计算的 1999 年全国陆地生态系统服务总价值 6.817 万亿元,2008 年 6.568 万亿元基本一致,与潘耀忠等人[28]2004 年通过生态资产遥感定量测量分析的结果 6.44 万亿元,与陈仲新等人[29]2000 年计算的 5.61 万亿元基本接近但略偏高。原因是:一是本文是在基于土地利用/覆盖的陆地生态系统类型划分基础上,总结并归纳出各类型土地面积所代表的不同陆地生态系统类型、各种服务功能价值的经验参数,即单位面积陆地生态系统服务功能的价值系数而计算的结果,而潘耀忠和陈仲新等人主要以中国植被数据为基础进行核算,因此所得到的全国土地类型与面积可能存在一定差别;其次,由于潘耀忠与陈仲新等人的研究结果是基于 20 世纪 80 年代和 90 年代初的中国植被遥感影像数据的估算而获得,在数据资料和时间节点上与本研究有一定差别;在中国陆地生态系统服务价值空间分布方面,本文得出中国陆地单位面积生态系统服务价值分布特点为中东部地区较高,西部地区较低,这与毕晓丽[30]和何浩[31]等人的研究结果一致。从中国陆地生态系统服务服务价值增量或变化情况来看,本文得出中国陆地 1980 至 2010 年间 ESV 呈增长趋势,年均增长 2.04%,单位面积 ESV 西部地区增长速度快于东中部地区,这与冉圣宏等人[32]的研究结果也基本一致。

3.2 中国陆地经济与生态环境发展演变动因

经济与生态环境发展是人类活动与自然环境共同作用,共同影响下的结果,自然环境决定着特定区域生态环境与人类生存状况,人类活动与社会经济发展反过来可以哺育或破坏生态环境的原本面貌。从中国陆地 EEHC 总体变化特征来看,中国陆地经济发展与生态环境协调度逐渐好转,且西部地区好于东部地区,这反映出我国的社会经济活动与自然生态环境关系之间总体上还是向着更可持续的方向在发展。从 1980—2000 年间,中国陆地 EEHC 局部好转,整体恶化,主要因为我国从 1978 年实行改革开放,经过 3 年调整期,自 1980 年开始经济增长开始显现,工业振兴与城市扩张并举,生态修复与土地退化并存,造成中国社会在“聚精会神搞建设,一心一意谋发展”的同时忽视了生态文明建设,造成中国社会生态系统服务功能增长量小于 GDP 增长量,从而导致 EEHC 有整体下降趋势;但从 2000 年开始,国家层面开始意识到生态建设的重要性,因此开始大力进行生态建设与生态修复工程,开展了退耕还林还草工程、生态修复工程、生态屏障建设工程和水土流失治理等工程,这些措施的综合效应,使我国生态环境有所改善,林地、草地面积扩大,在保证了 ESV 增量的同时,

社会经济也得到更好的发展,因此使得 2010 年的 EEHC 明显好于前三个研究时段。

3.3 研究结果的不确定性

考虑到经济社会发展与生态环境协调程度具有复杂性、综合性和不明确性等特点,而目前的评价技术和实践尚不能做到全面、科学和准确评价。因此,本研究也只是在总结前人研究成果的基础上,对中国陆地经济与生态环境发展的整体协调情况作一些简单评价,而在更加科学的估算方法上仍存在一些不足,主要表现在以下两个方面:(1)利用土地利用/覆盖数据作为生态系统服务价值评估的一种方式时,存在两个问题,即尺度和分类。不同分辨率下的土地覆盖类型是不同的,不同的分类体系表现出的土地覆盖类型也不同,当一种土地覆盖不能达到影像数据单位空间分辨率所代表的像元时,它在分类时由于有混合像元存在使得精度上有大打折扣,因此在未来的研究中,不论是基于遥感影像数据的直接提取还是修正,都有必要增加其有效的空间分辨率,以保证数据精度。(2)本文针对空间和时间因素基于经济发展和生态系统服务功能的协调度做了探讨,并以 GDP 和 ESV 作为考量重点,因此这种思路与方法有待于进一步验证其客观性,相关概念、研究方法和等级划分等方面也仍有待研究。

4 结论

(1)中国陆地经济与生态环境协调发展度逐渐好转,中国经济发展与生态环境二者之间尚未出现大面积的协调度丧失情况,反映出当面社会经济活动与自然生态环境关系之间总体上还是向着可持续的方向在发展。但另一方面,目前中国经济生态环境协调度(EEHC)的恶化区域面积大于协调区面积,且二者在地域分布上并不均衡,部分区域出现了两极分化现象,这些问题值得关注。

(2)中国陆地经济与生态环境协调发展的空间分布状态从 1980 年的低于均值聚集模式发展变化到 2010 年的高—低两种聚集模式共同分布,显示出热点高度聚集,冷点低度聚集的特征,这进一步说明中国陆地经济与生态环境协调发展模式向高和向低两个方向发展,并且在中国西南和东南两个区域同时波动变化。

(3)从以上结论可看出,目前中国陆地经济社会与生态环境发展协调度整体上趋于好转,但在区域分布上空间差异较为明显,西部地区在保护生态环境的同时需大力发展经济,而东中部地区则需在发展经济的同时注重生态保持与修复,中国的经济发展与生态环境建设工作依然任重而道远。

参考文献(References):

[1] 牛文元. 可持续发展理论的基本认知. 地理科学进展, 2008, 27(3): 1-6.

[2] Hein L, van Koppen K, de Groot R S, van Ierland E C. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. Ecological Economics, 2006, 57(2): 209-228.

[3] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, Lacey R E. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. Ecological Economics, 2001, 39(3): 333-346.

[4] Hein L, Koppen C S, Ierland E C, Leidekker J. Temporal scales, ecosystem dynamics, stakeholders and the valuation of ecosystems services. Ecological Economics, 2016, 21: 109-119.

[5] Helming K, Pérez-Soba M, Tabbush P. Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 77-10.

[6] Sutton P C, Costanza R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation. Ecological Economics, 2002, 41(3): 509-527.

[7] Sherrouse B C, Clement J M, Semmens D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services. Applied Geography, 2011, 31(2): 748-760.

[8] Wang Z B, Fang C L, Cheng S W, Wang J. Evolution of coordination degree of eco-economic system and early-warning in the Yangtze River Delta. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(1): 147-162.

[9] 王振波, 方创琳, 王婧. 1991 年以来长三角快速城市化地区生态经济系统协调度评价及其空间演化模式. 地理学报, 2011, 66(12): 1657-1668.

[10] 吴建寨, 李波, 张新时. 生态系统服务价值变化在生态经济协调发展评价中的应用. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2554-2558.

[11] 吴玉鸣, 张燕. 中国区域经济增长与环境的耦合协调发展研究. 资源科学, 2008, 30(1): 25-30.

[12] 叶得明, 杨婕妤. 石羊河流域农业经济和生态环境协调发展研究. 干旱区地理, 2013, 36(1): 76-83.

[13] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科, 韩艺师. 海南岛生态系统土壤保持空间分布特征及生态经济价值评估. 生态学报, 2000, 20(4): 552-558.

[14] 丁建军. 城市群经济、多城市群与区域协调发展. 经济地理, 2010, 30(12): 2018-2022.

[15] 范剑勇, 谢强强. 地区间产业分布的本地市场效应及其对区域协调发展的启示. 经济研究, 2010, (4): 107-119, 133-133.

[16] 杨士弘. 广州城市环境与经济协调发展预测及调控研究. 地理科学, 1994, 14(2): 136-143.

[17] 魏晓旭, 赵军, 魏伟, 颉斌斌. 基于县域单元的中国生态经济系统协调度及空间演化. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1535-1545.

[18] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[19] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.

[20] 苏飞, 张平宇. 基于生态系统服务价值变化的环境与经济协调发展评价——以大庆市为例. 地理科学进展, 2009, 28(3): 471-477.

[21] 乔标, 方创琳. 城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用. 生态学报, 2005, 25(11): 3003-3009.

[22] 刘浩, 王青, 李秀娟, 宋阳, 李广军. 辽宁省生态经济系统能值分析. 应用生态学报, 2008, 19(3): 627-633.

[23] 陈培阳, 朱喜钢. 基于不同尺度的中国区域经济差异. 地理学报, 2012, 67(8): 1085-1097.

[24] 荆玉平, 张树文, 李颖. 基于景观结构的城乡交错带生态风险分析. 生态学杂志, 2008, 27(2): 229-234.

[25] 高群. 国外生态-经济系统整合模型研究进展. 自然资源学报, 2003, 18(3): 375-384.

[26] 石晓丽, 王卫. 生态系统功能价值综合评估方法与应用——以河北省康保县为例. 生态学报, 2008, 28(8): 3998-4006.

[27] 石垚, 王如松, 黄锦楼, 阳文锐. 中国陆地生态系统服务功能的时空变化分析. 科学通报, 2012, 57(9): 720-731.

[28] 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 顾晓鹤, 范一大, 李京. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(4): 375-384.

[29] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报, 2000, 45(1): 17-22.

[30] 毕晓丽, 葛剑平. 基于 IGBP 土地覆盖类型的中国陆地生态系统服务功能价值评估. 山地学报, 2004, 22(1): 48-53.

[31] 何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 刘旭拢, 张晴, 朱秀芳. 中国陆地生态系统服务价值测量. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1122-1127.

[32] 冉圣宏, 吕昌河, 贾克敬, 齐永华. 基于生态服务价值的全国土地利用变化环境影响评价. 环境科学, 2006, 27(10): 2139-2144.